

17. AUGUST 2023



LCA SOM DESIGNVÆRKTØJ – REDUKTION AF KLIMAAFTRYKKET FOR ÉNFAMILIEHUSE

LCA-RAPPORT

BygherrePartner ApS
bygherrepartner.com



PROJEKT

LCA som designværktøj – Reduktion af klimaaftrykket for énfamiliehuse

UDARBEJDET AF

Anders Stokbro Ravn | BygherrePartner ApS

Storm Sommer | BygherrePartner ApS

Mikkel T. B. Volden | BygherrePartner ApS

GODKENDT AF

Mikkel T. B. Volden | BygherrePartner ApS

DATO

17. august 2023

DOKUMENTTYPE

LCA-rapport

VERSION: 1.0**BESKRIVELSE**

Formålet med dette LCA-studie er at vise, hvordan LCA kan bruges som designværktøj til at nedbringe et byggeris klimapåvirkninger – både ved at sammenligne datagrundlag, samt ændre materialevalg i konstruktioner. Der tages udgangspunkt i et enfamiliehus på 173 m², bygget med udbredte og anerkendte byggetekniske løsninger.

Først undersøges forskellen i klimaaftrykket for huset ved at sammenligne generisk og branchespecifik miljødata mod produktspecifik data. Herefter undersøges effekterne af at udskifte materialer til andre med overordnet samme egenskaber, fx forskellen på fabriksbeton, letbeton og porebeton. Sidst udføres et variantstudie på konstruktionsniveau, hvor de bedste (mindst klimabelastende) løsninger udvælges og sammensættes i den mindst klimabelastende version af enfamiliehuset. Resultaterne sammenlignes med de planetære grænser fra 'Reduction Roadmap'.

Denne rapport er syntesen af det større LCA-studie 'De fire enfamiliehuse' udarbejdet af BygherrePartner Aps, August 2022 – Maj 2023.



Indhold

1	Resumé	3
2	Introduktion til LCA	4
2.1	LCA-metoden	5
2.2	Absolut bæredygtighed og planetære grænser	6
3	Beregningsforudsætninger.....	7
3.1	Formål og afgrænsning	7
3.2	Usikkerheder	9
4	Præsentation af bygningsdesign	11
4.1	Drift	13
5	Resultater	14
5.1	Scenarie 1.1 (Baseline).....	14
5.2	Opvarmningstypens indvirkning på klimapåvirkningen	14
5.3	Scenarie 1.2 (Produktspecifik data)	15
5.4	Scenarie 2.2 (Optimeret data og konstruktion)	16
5.5	Scenarie 3.2 (Bedste konstruktion)	17
5.6	Sammenligning af husene/scenarierne	20
6	Diskussion	21
6.1	Planetære grænser	21
6.2	Konsekvens-LCA.....	21
7	Konklusion	23



1 RESUMÉ

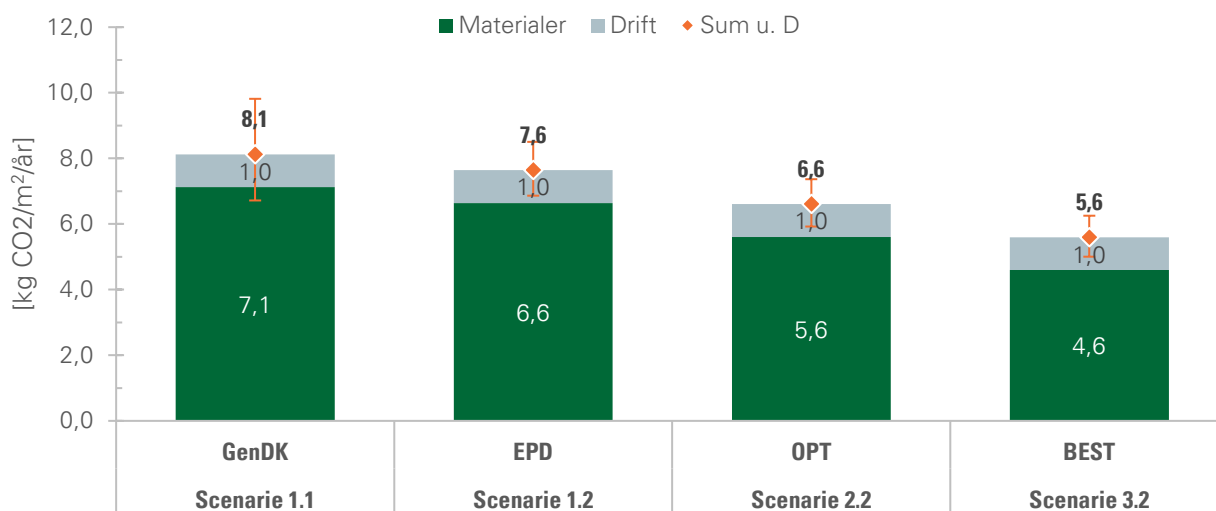
Formålet med dette LCA-studie er at vise, hvordan LCA kan bruges som designværktøj til at nedbringe et byggeris klimapåvirkninger, både ved at sammenligne datagrundlag, samt ændre materialevelag i konstruktioner. Der tages udgangspunkt i et enfamiliehus på 173 m², bygget med udbredte og anerkendte byggetekniske løsninger.

Rapporten beskriver overordnet LCA-metoden der anvendes i studiet, herunder konceptet om planetære grænser, og sætter en absolut bæredygtig grænseværdi for husets klimapåvirkning. Rapporten gennemgår grundigt forudsætningerne for beregningerne og vurderer ligeledes usikkerhederne i resultaterne.

Først undersøges forskellen ved at benytte generisk- og branchespecifik miljødata (scenarie 1.1), mod produktspecifik data (scenarie 1.2). Herefter undersøges effekterne af at skifte materialer med overordnet samme egenskaber, fx forskellen på fabriksbeton, letbeton og porebeton (scenarie 2.2). Til sidst udføres et variantstudie på konstruktionsniveau, hvor de bedste (mindst klimabelastende) løsninger udvælges og sammensættes i den mindst klimabelastende version af enfamiliehuset (scenarie 3.2). Resultaterne sammenlignes med de planetære grænser fra 'Reduction Roadmap'.

Resultaterne viser, at alle scenarier overholder Bygningsreglementets krav til klimapåvirkning på 12,0 kg CO₂e/m²/år (som dog kun gælder for nybyggeri >1000 m²). Resultaterne viser desuden, at den største mulighed for at nedbringe klimapåvirkningen uden at ændre konstruktioner eller design, er ved at vælge fjernvarme eller varmepumpe frem for naturgas. Ved primært at benytte EPD-data frem for generisk- og branchespecifik miljødata, kan klimapåvirkningen reduceres med ca. 6 %. Desuden reduceres usikkerheden i resultaterne, da EPD-data er mere retvisende for specifikke byggevarer. Fra scenarie 1.1 til scenarie 3.2 kan klimapåvirkningen reduceres med op til 31 %. Slutteligt viser resultaterne, at selv den bedste variant af data, konstruktioner og opvarmningskilde har en klimapåvirkning der er 7,5 gange højere end tilladt, for at være klimamæssigt absolut bæredygtig.

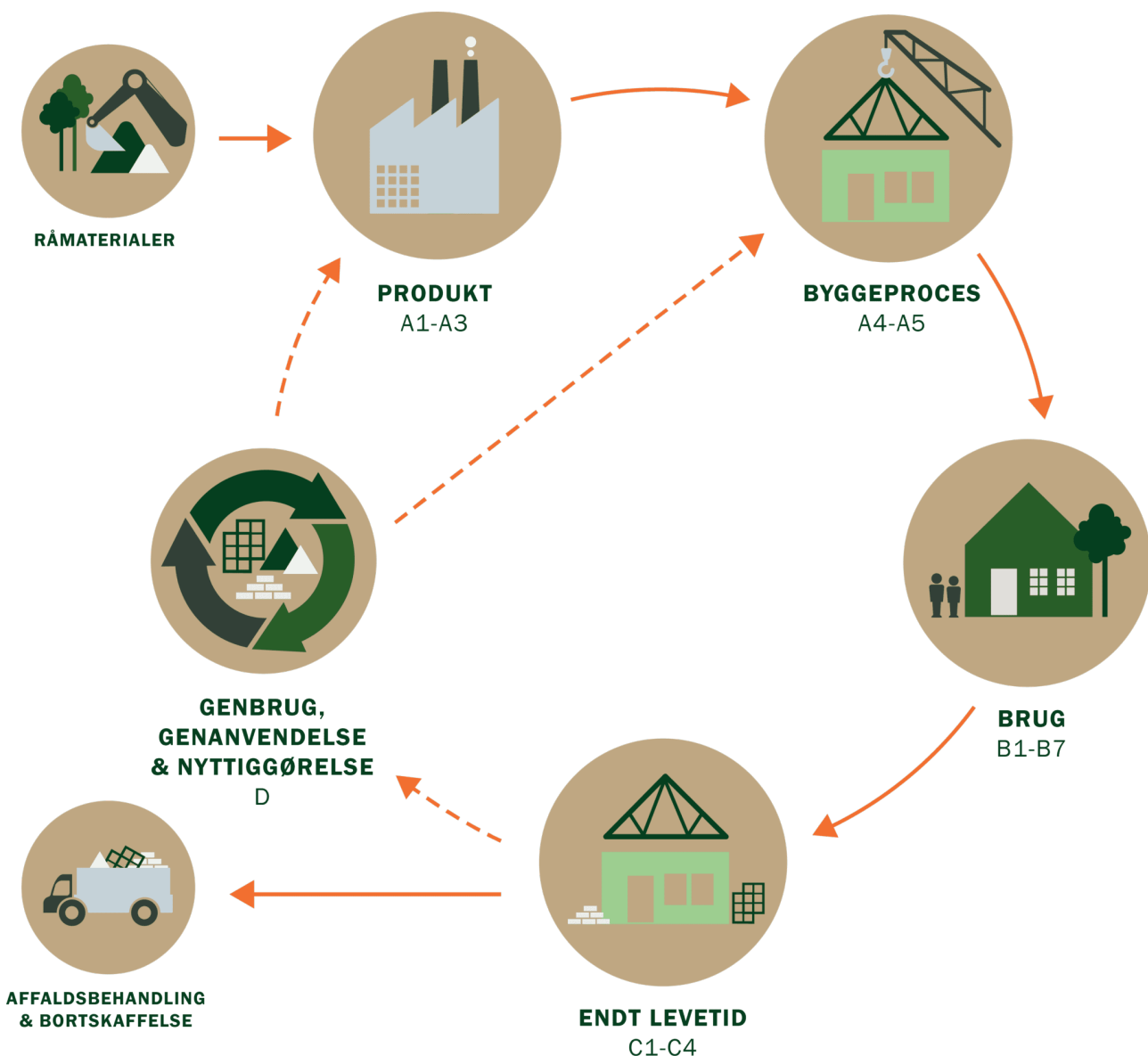
Der skal tages højde for de indlejrede usikkerheder, der bl.a. viser en lille mulighed for, at scenarie 2.2 er bedre end 3.2. Derudover gøres opmærksom på, at det ikke er alle livscyklusfaser der kvantificeres, herunder transport til byggepladsen, spild og energi brugt på byggepladsen.



Figur 1.1: Sammenligning af klimapåvirkningen på tværs af scenarier, fordelt på materialer og drift, med opvarmning af varmepumpe.

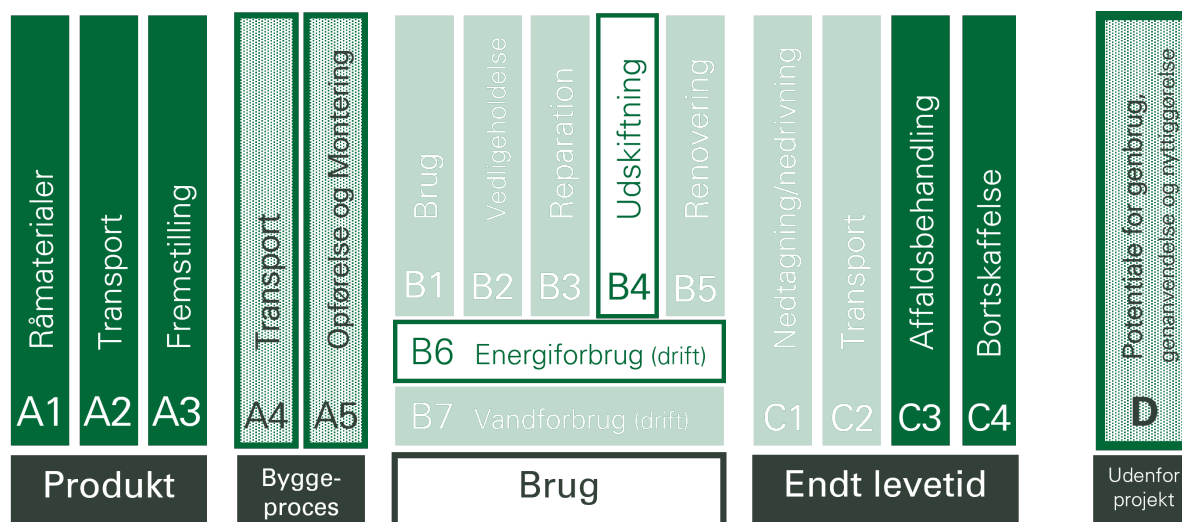
2 INTRODUKTION TIL LCA

LCA står for Life Cycle Assessment eller på dansk: livscyklusvurdering. Historisk set har fokus for bygninger været at reducere energiforbruget, men i dag ved man, at produktionen af byggematerialer medfører et energiforbrug og en signifikant påvirkning af det lokale og globale miljø. Dette kaldes *indlejrede* udledninger. En bygnings-LCA forsøger at sætte tal på de miljøpåvirkninger, som energi og materialeforbrug i en bygning har over hele bygningens levetid, altså fra indvinding af råmaterialer til materialeproduktion til nedrivning og bortskaffelse af bygningen. De forskellige faser som bygninger og materialer gennemgår kan ses på Figur 2.1, hvor hver "boble" medfører en klima- eller miljøpåvirkning¹. Desuden inkluderes transport af materialer og affaldsmængder. Det er typisk produktionen af materialer, samt energiforbruget til varme, der udgør den største del af klimapåvirkningerne fra bygninger.



Figur 2.1: Livscyklusperspektiv i en bygnings-LCA

¹ En klimapåvirkning henviser til udledning af drivhusgasser. En miljøpåvirkning kan fx dække over forurening af vandløb eller nedbrydning af ozonlaget.



Figur 2.2: Inkluderede moduler i en bygnings-LCA, jf. EN 15978

I praksis kan det være svært at indsamle den nødvendige viden til at udregne miljøpåvirkninger fra alle bygningens livscyklusfaser, og i Figur 2.2 kan man se, hvilke faser der typisk medregnes jf. den europæiske standard for udførelse af LCA på bygninger, EN15978. I **mørkegrøn** ses faserne A1-A3 og C3-C4, som relaterer sig til produktion og bortskaffelse af byggematerialer. Hertil kommer B4, som medregner udskiftning af byggematerialer, fx udskiftning af vinduer, der sker i løbet af bygningens levetid. Driften gennem bygningens levetid, forbruget af el og varme, opgøres under B6. Derudover opgøres potentialet for nyttiggørelse (typisk genbrug og genanvendelse) under modul D, som dog ikke medregnes i resultaterne, da det er usikkert, hvorvidt de indfris ved bygningens nedrivning. Det er disse førnævnte faser (A1-3, B4, B6, C3, C4 og D) der skal medregnes for LCA'er til Bygningsreglementet 2023. Yderligere faser *kan* medtages i en LCA, men kan i praksis være svære at opgøre, og er ikke en del af lovkravet indtil videre. Man må forvente, at der på sigt vil blive inkluderet flere moduler i LCA-beregninger på bygninger.

Resultaterne af en LCA opgøres i deres potentiale for at påvirke miljø og/eller klima. I denne rapport opgøres klimapåvirkningerne, der måles i CO₂-ækvivalenter og noteres [kg CO₂e]. Da der findes forskellige drivhusgasser med forskellig "styrke", omregnes deres styrke til at svare til CO₂. Fx har drivhusgassen metan en større drivhuseffekt end CO₂, og udledningen af 1 kg metan svarer til at udlede omkring 25 kg CO₂ (over en 100-årig periode²).

2.1 LCA-metoden

En LCA er en iterativ proces, bestående af fire trin:

1. Formål og afgrænsning (*goal and scope*)
2. Kortlægning (*inventory analysis*)
3. Vurdering af miljøpåvirkninger (*impact assessment*)
4. Fortolkning (*interpretation*)

Det vil ofte være nødvendigt at bevæge sig frem og tilbage mellem trinnene, for at højne kvaliteten af resultaterne, og styrke de konklusioner der kan drages på baggrund af LCA-studiet. Det kan fx være at øge datakvaliteten i sin kortlægning ved at bruge EPD-data frem for generisk data.

² Metans levetid er væsentlig kortere end CO₂'s, hvorfor det er vigtigt at angive tidsperioden. Den normale tidsperiode, der anvendes til at måle klimapåvirkning, er 100 år.

Der findes to internationale standarder for LCA'er: ISO 14040 (2008), som beskriver principper, og struktur samt ISO 14044 (2008), der specificerer krav og vejleder. En videreudvikling af disse to standarder, med mere specifikke beskrivelser og vejledninger af kravene til LCA findes i International Life Cycle Data system (ILCD 2010) for større sammenhæng og kvalitetssikring ved anvendelse af LCA. Disse standarder bør altid følges ved udførelse af en LCA-beregning.

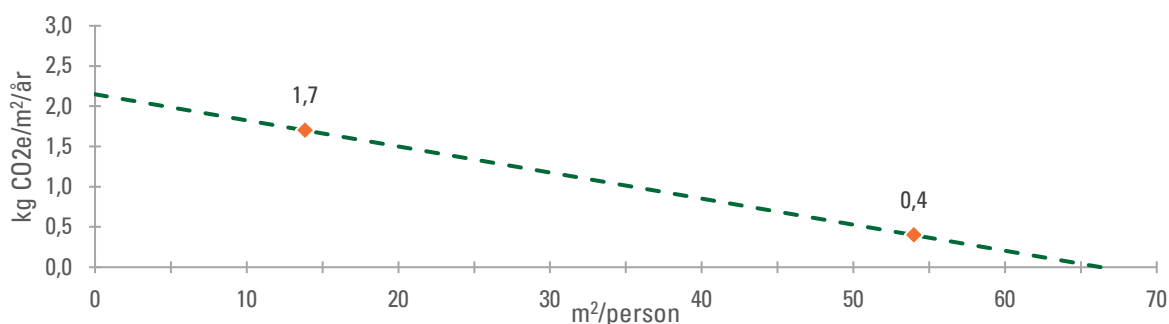
Inden for byggesektoren følges normalvis den europæiske standard EN15978, som beskriver beregningsmetoden for vurdering miljømæssige kvaliteter inden for byggeri og anlæg, samt DS/EN 15804 (2019) der beskriver grundlæggende regler for beregning af byggevarer – heriblandt EPD'er.

2.2 Absolut bæredygtighed og planetære grænser

For at sætte klimapåvirkninger fra byggeriet i perspektiv, var den gennemsnitlige danskers CO₂-udledning i 2019 ca. 7,5 ton CO₂e³. Forskning i planetære grænser peger på, at et absolut bæredygtigt niveau for CO₂-udledning er lidt mindre end 1 ton CO₂e per person⁴. Forskningsprojektet Reduction Roadmap⁵ har forsøgt at kortlægge, hvor stor klimapåvirkningen fra nybyggeri må være, for at kunne betragtes som absolut bæredygtigt – dvs. en udledning der holder sig indenfor de planetære grænser og ikke bidrager til klimaforandringer.

Hvis den nuværende danske byggerate, 3 mio. kvadratmeter årligt, fastholdes, skal nybyggeriets klimapåvirkning reduceres til 0,4 kg CO₂e/m²/år. Denne reducerede klimapåvirkning skal desuden være opnået mellem 2029 og 2036, alt efter om der skal være hhv. 87 eller 50 % chance for at overholde Paris-aftalens mål om at holde den globale opvarmning under 1,5 °C. Reduceres byggeraten til 770 tusind kvadratmeter årligt, kan loftet hæves til 1,7 kg CO₂e/m²/år.

I 2022 var den gennemsnitlige danskers arealforbrug omkring 54 m² per person⁶, og antager man at dette er i overensstemmelse med den gennemsnitlige byggerate, får man, at den absolut bæredygtige klimapåvirkning per kvadratmeter per år er 0,4 kg CO₂e. Antager man en reduktion i samme størrelsesorden som fra 3 mio. til 770 tusind kvadratmeter, vil det resulterende arealforbrug per person være omkring 14 m², med en tilladt klimapåvirkning på 1,7 kg CO₂e. På Figur 2.3 kan man se den lineære fremstilling af forholdet mellem arealforbrug per person og den tilladte klimapåvirkning. Således kan man, hvis man aktivt forsøger at reducere arealforbruget per person, tillade sig at have en højere klimapåvirkning per kvadratmeter i et absolut bæredygtigt perspektiv.



Figur 2.3: Sammenhæng mellem arealforbrug per person og maksimalt tilladt klimapåvirkning pr. m² referenceareal pr. år

³ <https://ourworldindata.org/grapher/per-capita-ghg-excl-land-use?tab=chart&country=~DNK> Besøgt den 16-02-2023.

⁴ Bjørn, A. & Hauschild, M.Z. (2015). *Introducing carrying capacity-based normalisation in LCA: framework and development of references at midpoint level.* <https://doi.org/10.1007/s11367-015-0899-2>

⁵ <https://reductionroadmap.dk/> Besøgt den 16-02-2023.

⁶ <https://www.bolius.dk/hvor-stort-er-et-gennemsnitligt-hus-raekkehus-lejlighed-og-sommerhus-i-danmark-36883> Besøgt den 16-02-2023.



3 BEREGNINGSFORUDSÆTNINGER

3.1 Formål og afgrænsning

FORMÅL

Formålet med dette LCA-studie er at vise, hvordan LCA kan bruges som designværktøj til at nedbringe et byggeris klimapåvirkninger, gennem hotspotanalyser og variantsammenligninger.

Resultaterne kan bruges i den tidlige designfase til at træffe materiale- og konstruktionsvalg, som reducerer klimaaftrykket fra nybyggeri.

Rapporten gøres frit, offentligt tilgængelig og konklusionerne skal således være robuste, og det skal understreges hvilke konklusioner der kan og ikke kan drages af studiet, hvilke udfordringer der kan opstå ved den anvendte LCA-metode, samt usikkerhederne i studiet generelt.

PRODUKTSYSTEM

Systemet, der analyseres, er et enfamiliehus bygget efter udbredte og typiske byggeprincipper, som ses på det danske marked. Klimapåvirkninger fra materialer samt drift analyseres, men selve byggefasen samt transport til byggepladsen medtages ikke. En detaljeret oversigt over husets opbygning kan ses i kapitel 4.

SYSTEMGRÆNSE

Jf. EN15978 – se Figur 2.1 og Figur 2.2.

FULDSTÆNDIGHEDSKRAV

3D-bygningsmodellen er tegnet af BygherrePartner til en detaljegrad af LOD 300. LCA-modellen indeholder alle bygningsdele, og materialer er medtaget i detaljegrad, som er typisk for LCA-modeller udført i Danmark. Dvs. at fuger omkring vinduer og døre fx ikke er medtaget, mens skruer og fastgørelsesmidler er medtaget som generiske overslagsmængder. Se desuden afsnit 3.2 for en vurdering af usikkerheder i LCA studiet.

LCIA-METODE

Beregningerne er udført efter EN15978 i softwaren LCAbyg 5.3.1.0 (BUILD). Beregningsforudsætningerne kan ses i Tabel 3.1. Levetider er baseret på BUILD levetidstabel 2021⁷ over standardiserede levetider for byggevarer; alternativt direkte fra producenten, hvis den forventede levetid er opgivet af producenten med tilstrækkelig dokumentation (fx ETA⁸).

Tabel 3.1: Beregningsforudsætninger for LCA som designværktøj – Reduktion af klimaaftrykket for énfamiliehuse

Livscyklusfaser	A1-A3, B4, B6, C3-C4, D
Betragtningsperiode	50 år
Teknisk drift	Estimeret overholdelse af BR18
Opvarmningstype	Gas (gasfyr) El (luft-vand varmepumpe) Fjernvarme
Miljøpåvirkningskategorier	GWP (Klimapåvirkningspotentiale)

⁷ Haugbølle, K., Mahdi, V., Morelli, M., & Wahedi, H. (2021). *BUILD levetidstabel: Version 2021*. Institut for Byggeri, By og Miljø (BUILD), Aalborg Universitet. <https://build.dk/Pages/BUILD-levetidstabel.aspx>

⁸ <https://www.etadanmark.dk/da/eta/hvad-er-en-eta> Besøgt den 09-02-2023.



Driftsenergien til bygningen er antaget at udfylde energirammen i BR18 uden tillæg, baseret på gennemsnitlige U-værdier for de primære bygningsdele, som af erfaring er passende for et étplans énfamiliehus ved overholdelse af energirammen⁹.

ALLOKERINGSMETODE

LCA'en følger standarden EN15978 og data i GenDK og fra EPD'er følger EN15804. Dette betyder, at LCA'en kan betragtes som en *attributional* LCA (A-LCA). I en A-LCA forsøger man at beskrive de relevante miljømæssige fysiske materialestrømme til og fra produkt/systemet og dets undersystemer¹⁰. Dvs. man prøver at afskære produktet, så man kan kortlægge miljøpåvirkningerne der direkte kan relateres hertil. I modsætning hertil findes *consequential* LCA (C-LCA), der undersøger, hvad effekterne af at bruge et produkt er, fx hvad der sker, hvis al plastikaffald i Danmark afbrændes frem for at genanvendes.

Da den data, der anvendes, er udført i overensstemmelse med EN15804 er der klare regler for, hvordan brug af genanvendte råmaterialer regnes, samt hvorledes materialer der sendes til genbrug eller genanvendelse ved endt levetid regnes. EN15804 baserer sig på *cut-off*-metoden, der betyder, at selve det genanvendte eller genbrugte råmateriale, der anvendes i produktionen, medregnes uden klimapåvirkninger. Dog skal påvirkninger ifm. materialebehandlingen af det genanvendte materiale medregnes. Benytter man sig af et materiale, der ved endt levetid kan genanvendes eller genbruges, regnes miljøpåvirkningerne forbundet hermed som en del af fasen C3, mens de mulige gevinster ved genanvendelsen regnes som en del af fase D (se Figur 2.2).

DATAKRAV

Miljødata kan enten baseres på generisk eller produktspecifik data. Generisk data repræsenterer gennemsnitlige byggevarer, der findes på markedet. Den generiske database i LCAbyg, benævnt "GenDK", er adapteret fra den tyske Ökobau-database, der er udviklet af det tyske Bundesministerium for Boliger, Byudvikling og Byggeri¹¹. Herudover kan data fra såkaldte branche-EPD'er også findes i GenDK-databasen i LCAbyg for visse byggevarer (f.eks. flere typer beton samt konstruktionstræ).

En EPD er en *Environmental Product Declaration*, eller på dansk en miljøvaredeklaration, og branche-præfikset indikerer, at disse EPD'er er udviklet som et gennemsnit af producenter, der typisk er organiseret under samme brancheforening. Således er branche-EPD'er gennemsnitlige data for et meget specifikt marked.

Miljøvaredeklarationer kan dog også udføres for enkelte, specifikke produkter og betragtes i disse tilfælde som den mest retvisende data (såfremt det indbyggede produkt i det betragtede produkt-system stemmer overens med EPD'en). Når der anvendes EPD'er, skal man være opmærksom på, hvorvidt den er tredjepartsverificeret. Der findes forskellige programoperatører¹², som udgiver EPD'er og samtidig sørger for, at de er 3. parts verificerede og i øvrigt overholder den gældende standard for EPD'er, EN15804.

Når der i de indledende designfaser benyttes EPD-data, gøres dette for at vise potentialerne ved at vælge specifikke produkter, der har forsøgt at minimere deres klimapåvirkning, eksempelvis ved

⁹ Se fx <https://www.rockwool.com/dk/downloads-og-tools/bygningsreglement/minimumstykkelser-for-isolering/>

¹⁰ Ekvall, T. (2020). Attributional and Consequential Life Cycle Assessment. Sustainability Assessment at the 21st Century. doi: 10.5772/intechopen.89202

¹¹ <https://www.oekobaudat.de/en.html> Besøgt den 16-02-2023.

¹² Se fx www.epddanmark.dk (DK), www.epd-norge.no (NO), www.ibu-epd.com (DE)



reduceret energiforbrug i produktionen eller større andel af genanvendt materiale i produktet. Her skal man være opmærksom på, at de viste reduktioner således kun opnås, hvis det faktiske produkt anvendes i byggeriet.

I denne rapport arbejdes der med to data-scenarier for miljødata, hhv. ét hvor der er anvendt generisk data fra Ökobau (benævnt GenDK i LCAbyg), samt dansk branchedata. Dette scenarie benævnes 'X.1'. Det andet scenarie, anvender EPD-data i videst muligt omfang, benævnt 'X.2'

EPD-data er repræsentativ for produkter anvendt i den danske byggebranche. Undervejs i projektet, vil forskellige EPD'er blive sammenlignet. Her skal det understreges, at eventuelle reduktioner i virkeligheden vil være afhængige af, at det specifikke produkt, som en EPD dækker, vælges.

3.2 Usikkerheder

LCA-beregninger er usikre af natur, da miljødata og antagelser om transportafstande ofte er gennemsnitlige, mængder er baseret på ukomplette 3D-modeller og nogle materialer og materialegrupper udelades helt, eksempelvis fuger eller tekniske installationer.

For at imødekomme dette og belyse usikkerheden i et LCA studie, har vi udviklet **BygherrePartner Usikkerhedsmatrix**, hvor vurderingen af usikkerheder i studiet baserer sig på Pedigree-metoden, der er en simplificeret metode til at udlede usikkerhedsfaktorer fra en kvalitativ vurdering af data¹³.

Usikkerheden i LCA-resultaterne vurderes på følgende fire parametre:

1. **Datakvalitet**
Anvendes der EPD- eller generisk miljødata?
2. **Modelkvalitet**
Hvor retvisende er mængdeudtrækket fra modellen? (Hvilket LOD er modelleret)
3. **Konstruktionsdetaljer, LCA model**
Hvor retvisende er konstruktioner modelleret i LCA-modellen? Er der medtaget armering, bindere o.l.?
4. **Teknisk drift**
Er den tekniske drift baseret på en Be18-beregning, varmetabsberegning eller antagelse?

Hver parameter tildeles et kvalitetsniveau mellem 1 og 5, hvor 1 er bedst. Dette kvalitetsniveau korresponderer med en værdi, og den overordnede usikkerhed udregnes¹⁴, som vist i nedenstående ligning. Miljødata, 3D-model og konstruktioner relaterer sig alle til de indlejrede miljøpåvirkninger, hvor påvirkningerne fra teknisk drift relaterer sig til driftsfasen af bygningen. Da disse to ikke er direkte relateret, vægtes usikkerhederne efter deres andel af den samlede påvirkning. De vurderede usikkerhedsniveauer for dette projekt er markeret med pile i Tabel 3.2.

$$\sigma_{tot}^2 = \%_{indlejret} \cdot \left(e^{\sqrt{\ln(U_{miljødata})^2 + \ln(U_{LOD})^2 + \ln(U_{LCA})^2}} \right) + \%_{drift} \cdot U_{drift} \quad (1)$$

¹³ <https://pre-sustainability.com/articles/improved-pedigree-matrix-approach-for-ecoinvent/> Besøgt den 09-02-2023.

¹⁴ Regnes som en geometrisk standardafvigelse, σ_g^2 , der er en faktor der hhv. multipliceres og divideres med resultatet



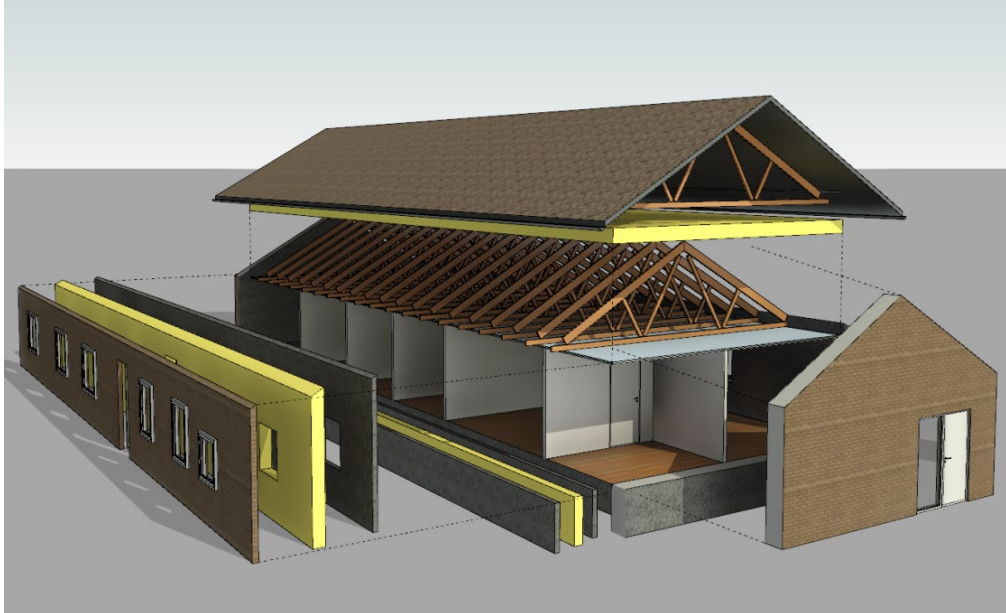
Tabel 3.2: Usikkerhedsniveauer

	INDLEJRET			DRIFT
	Datakvalitet (miljødata)	Datakvalitet (LOD/mængder)	Detaljegrad (LCA-model)	Detaljegrad (teknisk drift)
1	1,05 (Næsten) udelukkende EPD-data	1,0 Produktionsmodel LOD 400	1,0 Yderst detaljeret (fu- ger/skruer medtaget)	1,0 Be18-beregning (byggeandragende)
2	X.2 → 1,08 EPD-data for største materiemængder	1,02 Standard 3D-model med tekniske installationer LOD 325	→ 1,02 Primære materialer i kon- struktioner samt tekniske installationer	1,05 Be18-beregning (udbudsprojekt)
3	1,14 Ligelig fordeling mellem EPD- og generisk data	→ 1,05 Standard 3D-model uden tekniske installationer LOD 300	1,05 Primære materialer i kon- struktioner	1,1 Be18-beregning (screening)
4	X.1 → 1,2 Generisk data for stør- ste materiemængder	1,17 Tidlig designfase (LCA-screening) LOD 200	1,1	-
5	1,23 (Næsten) udelukkende generisk data	1,29 Volumenmodel LOD 100	1,2 Groft opbygget (fx ingen armering)	→ 1,2 Antaget energiforbrug (ud fra energiramme)

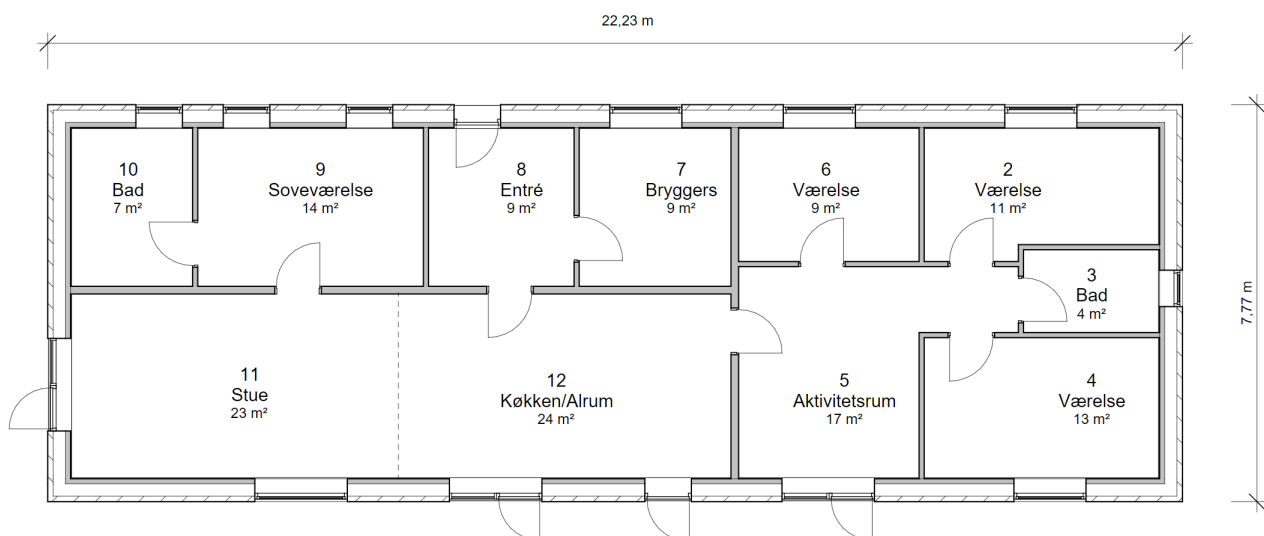
De endelige usikkerheder er 1,21 for scenariet med generisk data (X.1) og 1,10 for scenarierne med produktspecifik data (X.2). I kombination med driften er spændet for usikkerheden på **11-21 %** alt efter scenarie og opvarmingskilde.

4 PRÆSENTATION AF BYGNINGSDESIGN

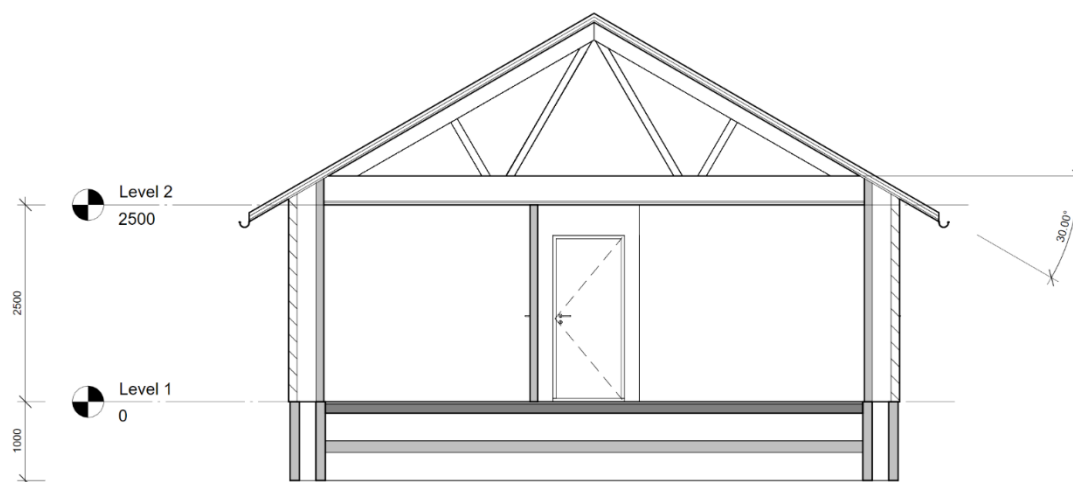
Huset der undersøges, er et traditionelt tungt énfamiliehus, hvor alle vægge (både ind- og udvendige) er tunge. Klimaskærmen er ligeledes tung, bestående af teglsten. Taget er et saddeltag af gitterspær, belagt med vingetegl. Det uopvarmede loftsrums isoleres med indblæst loftisolering (granulat). Husets samlede bruttoareal er 173 m² og er beregnet til fire personer. Se Figur 4.1, Figur 4.2 og Figur 4.3.



Figur 4.1: Isometri af Hus A, der viser bygningsdelene og disses opbygning.



Figur 4.2: Grundplan af Hus A



Figur 4.3: Tværsnit C – Opbygning af fundament, terrændæk, ydervægge og tagkonstruktion

I Tabel 4.1 ses en oversigt over konstruktioner og opbygninger i scenarie 1. Bemærk, der er kun nævnt de materialer, som er medregnet i LCA-modellen. Af tabellen fremgår ligeledes de respektive mængder for bygningsdelene.

Tabel 4.1: Oversigt over bygningsdelenes opbygning og mængder. Mængder og materialer ændres som en del af designprocessen, hvorfor beskrivelser er generiske eller givet som intervaller.

Bygningsdel Mængde	Opbygning
Fundament 58,05 m	Linjefundament: 400/390 mm letklinkerblokke med EPS-midte + bund af 700/390 mm armeret fabriksbeton
Terrændæk (U=0,1) 145 m ²	20 mm egeparket, flydende 3 mm trinlydisolering 40 mm afretningslag, cementbaseret Terrændæk: 120 mm Beton C25/30 300 mm EPS 0,4 mm radonspærre 100 mm afretningsgrus
Ydervæg (U=0,14) 151 m ²	Akrylmaling (2 lag + grunder + 5 mm fuldspartling) 120 mm tung bagmur, letbeton 230 mm kl. 34 mineraluld 108 mm teglsten og cementbaseret mørtel
Tag – Tagbeklædning (U=0,1) 235 m ²	Gitterspær Undertagsmembran Trykimprægnerede klemlister Vingetegl
Indervæg, bærende 44 m ²	Akrylmaling (2 lag + grunder) 11 mm pudslag (cementbaseret) 100 mm tung væg, letbeton 11 mm pudslag (cementbaseret) Akrylmaling (2 lag + grunder)

Bygningsdel Mængde	Opbygning
Indervæg, ikke-bærende 62 m ²	Akrylmaling (2 lag + grunder) 11 mm pudslag (cementbaseret) 100 mm tung væg, letbeton 11 mm pudslag (cementbaseret) Akrylmaling (2 lag + grunder)
Lofter 147 m ²	Akrylmaling (2 lag + grunder) 2x 12,5 mm gipsplader 45x45mm lægter (cc 400mm) Dampspærre (PE) 400 mm mineraluld, granulat
Vinduer, døre, glas Vinduer: 12,59 m ² Yderdøre: 3,71 m ² Glasparti: 11,2 m ² Inderdøre: 9 stk.	3-lags rude Træ-alu ramme/karm Hoveddør, isoleret/alu Inderdøre som fyldningsdøre
Installationer, vand/el/varme	BR18 standardværdier, enfamiliehuse
Forsyningsanlæg og varmekilde	Varmepumpe (SCOP=4.0), fjernvarme eller gasfyr
Ventilation	Ingen mekanisk ventilation

4.1 Drift

Der regnes med tre forskellige opvarmningsscenarier, hvor huset enten opvarmes med varmepumpe, gasfyr eller fjernvarme. Energirammen for huset er på 35,78¹⁵ kWh/m²/år og benyttes som det dimensionerende varmetab for huset. Det indtastede driftsforbrug til varme afhænger af varmekilden, se Tabel 4.2.

Tabel 4.2: Energiramme, virkningsgrad og indtastet driftsforbrug til varme for 3 forskellige varmekilder

Varmekilde	Energiramme (ER) [kWh/m ² /år]	Primærenergifaktor (EF) [-]	Nyttevirkning (NV) [-]	Driftsforbrug, varme (ER/NV)*EF [kWh/m ² /år]
Naturgas	35,78	1,0	1,0 ¹⁶	35,78
Fjernvarme	35,78	0,85	1,0 ¹⁷	30,41
El (varmepumpe)	35,78	1,9	SCOP = 4,0 ¹⁸	16,99

¹⁵ Jf. Bygningsreglementet §259: $30 \text{ kWh/m}^2/\text{år} + ((1.000 \text{ kWh}/\text{år}) / 173 \text{ m}^2) = 35,78 \text{ kWh/m}^2/\text{år}$

¹⁶ Forventet virkningsgrad på ml. 0,96 og 1,04

¹⁷ Forventet nettab på 20 % er inkluderet i primærenergifaktoren. (cowi (2020), *opdaterede emissionsfaktorer for el og fjernvarme*, <https://bpst.dk/da/-/media/BPST-DA/Byggeri/Lister/Publikationer/Opdaterede-emissionsfaktorer-for-el-og-fjernvarme.pdf>)

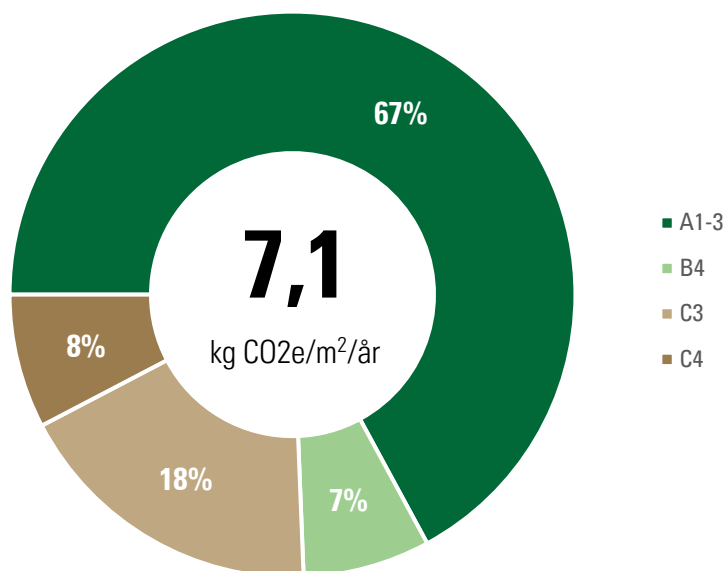
¹⁸ Baseret på de dårligste luft-vand varmepumper (gulvarme) fra Energistyrelsens varmepumpeliste: <https://sparenergi.dk/forbruger/vaerktoejer/varmepumpeliste>



5 RESULTATER

5.1 Scenarie 1.1 (Baseline)

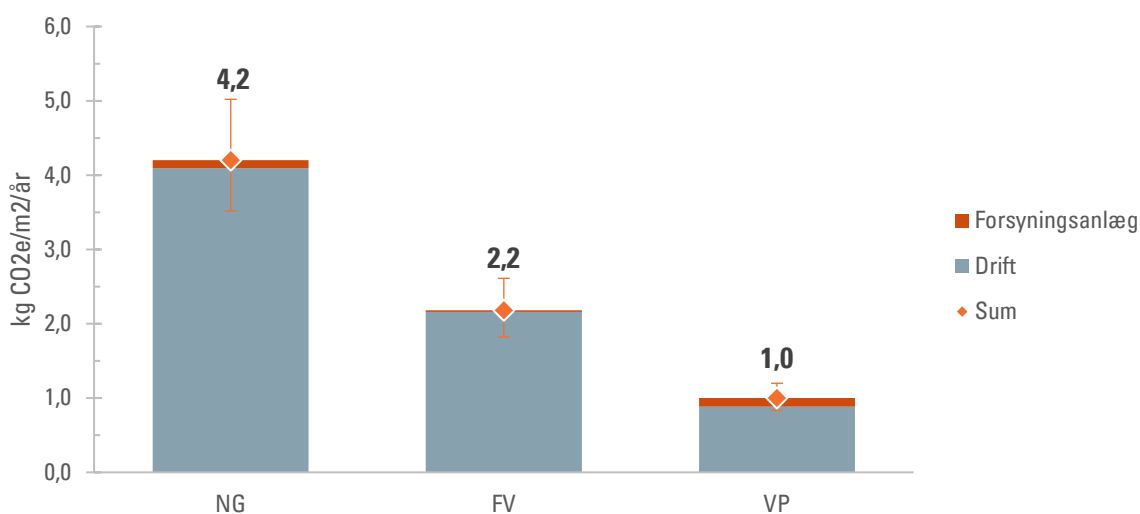
For scenarie 1.1, der primært består af generisk og branchespecifik data, er den indlejrede klimapåvirkning for materialer 7,1 kg CO₂e/m²/år. Den totale påvirkning over en 50-årig periode er 61,6 ton CO₂e for materialerne. På Figur 5.1 fremgår faseinddelingen af påvirkningerne for materialer, hvor det ses, at 2/3-dele af klimapåvirkningerne sker under produktionen af disse.



Figur 5.1: Indlejret klimaafttryk for scenarie 1.1.

5.2 Opvarmningstypens indvirkning på klimapåvirkningen

Klimapåvirkningen fra tre typiske varmeforsyningskilder er undersøgt for enfamiliehuset. Alle opvarmnings-scenarier benytter gulvvarme og der er taget højde for forsyningsanlæggets indlejrede påvirkninger scenarier imellem. Alle energikilder benytter sig af fremskrivningsscenarioer for energisammensætning fra Energistyrelsen, som er implementeret i LCAbyg.



Figur 5.2: Sammenligning af klimapåvirkningen for tre forskellige opvarmningsscenarioer over en 50-årig periode, med fremskrivning af energikilderens klimapåvirkning. NG: Naturgas, FV: Fjernvarme og VP: Varmepumpe

Figur 5.2 viser, hvor stor en forskel opvarmningstypen kan gøre for et byggeris klimapåvirkning, hvor den største påvirkning kommer fra opvarmning med naturgas og den mindste fra opvarmning med en luft-vand varmepumpe. Da forbruget til den tekniske drift er baseret på en antagelse om overholdelse af bygningsreglementets energiramme, er der en usikkerhed forbundet hermed. Dog ses, at denne usikkerhed ikke rykker ved konklusionerne om, hvilken opvarmningstype der har den hhv. største og mindste CO₂e-udledning.

Den mindste klimabelastning er dog ikke nødvendigvis ensbetydende med den bedste løsning, holistisk set. El har en mindre klimabelastning, men hvis et helt boligområde opvarmes med varmepumper, kan dette f.eks. potentielt føre til overbelastning/spidsbelastning af el-nettet, og fjernvarme kan i disse situationer være fordelagtig. Endvidere giver fjernvarme iflg. CONCITO en større fleksibilitet ift. el-forbrug, hvor fjernvarmesystemer via deres lange vandførende ledningsnet kan "lagre" varme og således bruge mindre el, når priserne er højest. Desuden kan fjernvarmesystemerne nemmere kobles til overskudsvarme fra fx datacentre, som kan bruges til opvarmning af bygninger¹⁹.

Dansk forskning i energisystemer peger ligeledes på, at størstedelen af varmen til bygninger i 2050 skal leveres af fjernvarmenettet²⁰, for at overholde Paris-aftalen.

Der findes dog også kritik af den danske fjernvarmeforsyning, da en del af varmen produceres vha. biomasse, som regnes CO₂-neutralt^{21,22}. Der er en del diskussion om, hvorvidt denne antagelse er korrekt, og hvad de reelle effekter af afbrænding af biomasse er, og den reelt bæredygtige løsning til opvarmning af bygninger og byområder er således ikke tydelig, men afhængig af flere faktorer.

5.3 Scenarie 1.2 (Produktspecifik data)

For scenarie 1.2 er datagrundlaget ændret på specifikke produkter fra generisk data fra GenDK-databasen med produktspecifikke EPD'er. Der er valgt EPD-data for udbredte produkter på det danske marked, og det er primært isoleringsmaterialer, gipsplader (loft), mursten og vingetegl, der er fundet EPD-data på. Det skal understreges, at reduktionerne fra generisk data til produktspecifik er afhængig af, at de faktiske produkter anvendes i byggeriet.

Scenarie 1.2 har et klimaaftryk på 6,64 kg CO₂e/m²/år, hvilket er en (teoretisk) reduktion på 7% ift. baseline. For hele huset svarer det til omkring 4,1 ton CO₂e, hvilket udelukkende er opnået ved at vælge et produkt med en EPD. Som nævnt er dette en teoretisk reduktion, da der ikke findes et "generisk produkt", og alle produkter vil have deres eget miljøaftryk. Der er en stigende tendens til, at producenter arbejder aktivt med at reducere deres produkters klimaaftryk, og derfor kan det godt lade sig gøre, at opnå reelle reduktioner, ved at vælge ét produkt frem for et andet, men det skal afgøres specifikt på EPD-niveau igennem variantstudier, hvilket blandt andet er et fokuspunkt i scenarie 2.2.

¹⁹ Dyck-Madsen, S., Damsø Pedersen, C. & Jarby, C. (2021). *Varmeforsyning af nye bygninger: Fremsynsnotat*. <https://concito.dk/udgivelser/varmeforsyning-nye-bygninger>

²⁰ Maya-Drysdale, D. W., Mathiesen, B. V., Berthillot, B., Abid, H., Korberg, A. D., Skov, I. R., & Johannsen, R. M. (2022). *Energy Efficiency 2050 Roadmap: Denmark*. https://vbn.aau.dk/ws/portalfiles/portal/478084590/Denmark_country_report_printable.pdf

²¹ <https://ing.dk/holdning/leder-lyt-til-vismaend-og-forskere-vi-skal-ikke-braende-mere-trae-af> Besøgt d. 06/07 2023

²² <https://www.altinet.dk/klima/artikel/klimaraadet-advarer-ny-fjernvarme-maa-ikke-oege-forbruget-af-biomasse> Besøgt d. 06/07 2023



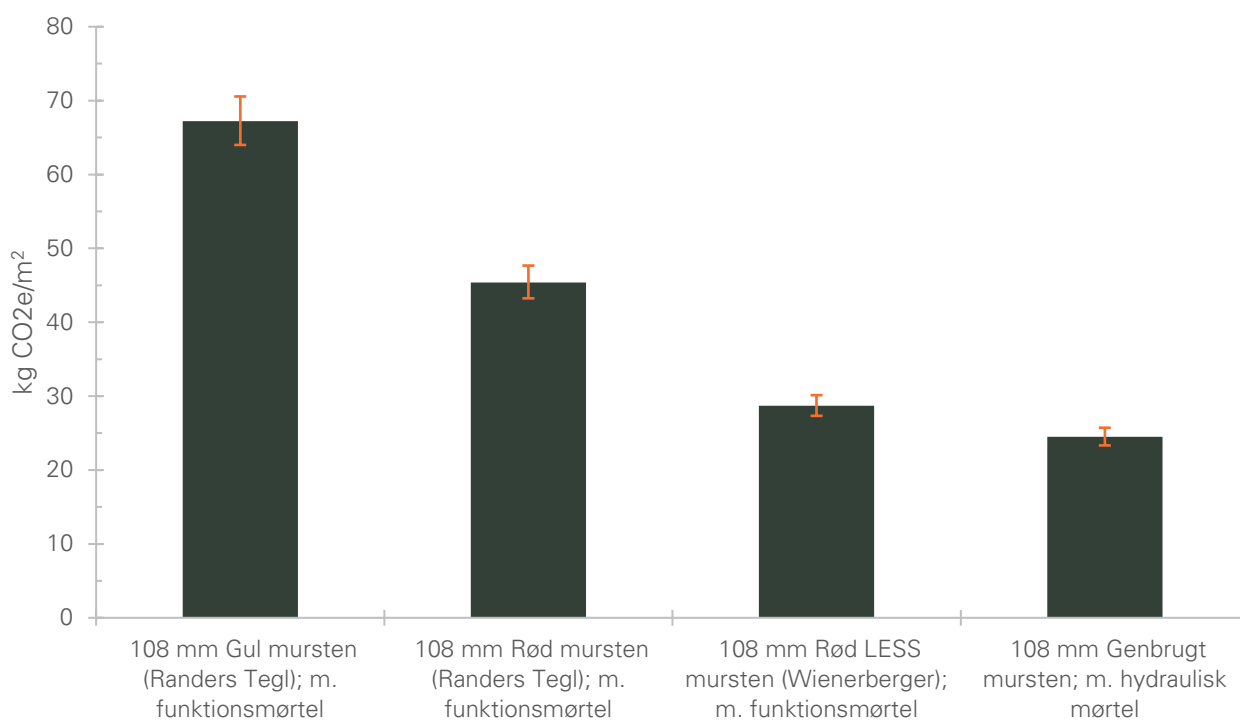
En interessant iagttagelse er, at når scenarie 1.2 opvarmes med varmepumpe, så overholdes grænsen til den frivillige lavemissionsklasse på 8,0 kg CO₂e/m²/år²³. Dette er interessant, da Hus A betragtes som et traditionelt hus, hvor der ikke er gjort særlige tiltag for at gøre det "bæredygtigt" eller reducere udledningerne herfra – der er blot installeret en varmepumpe og benyttet produkt-specifik miljødata til LCA beregningen.

5.4 Scenarie 2.2 (Optimeret data og konstruktion)

I scenarie 1.2 udgør ydervægge, terrændæk og fundamenter hver især store andele af de samlede klimapåvirkninger. I dette scenarie undersøges, hvor store klimareduktioner der kan opnås ved at vælge de bedste materialer indenfor samme materialekategori, dvs. de bedste materialer (klimamæssigt) på markedet.

Med udgangspunkt i ydervæggen vises processen herunder:

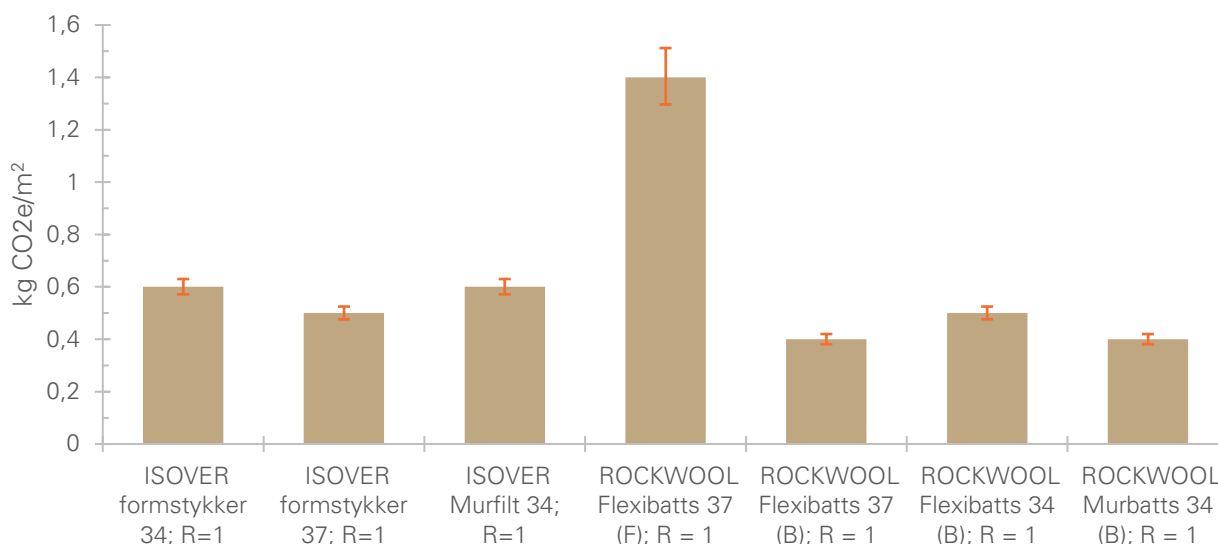
Ydervæggen består af en formur af teglsten, en midterdel af mineraluld og en bagmur af letbeton. For alle materialegrupper undersøges et udsnit af tilsvarende produkter på det danske marked, og det materiale, med den mindste klimapåvirkning udvælges til scenarie 2.2.



Figur 5.3: Sammenligning af murværk med forskellig EPD-data for mursten. Der sammenlignes 1 m² murværk.

For formuren ses det, at de gule mursten, som bruges i scenarie 1.2, har en væsentlig højere klimapåvirkning end de øvrige typer mursten. Det bedste produkt er genbrugte mursten, mens Wienerberger LESS-mursten har en klimapåvirkning i samme størrelsesorden. For formuren kan klimapåvirkningen således halveres, ved valg af det bedste produkt på markedet.

²³ <https://bygherrepartner.com/klimakrav-lca-i-bygningsreglementet/> Besøgt den 09-03-2023.



Figur 5.4: Sammenligning af EPD-data for forskellige producenter og typer af mineraluld. For Rockwool forefindes EPD'er med to forskellige energikilder anvendt i produktionen: B: biogas / F: fossil (naturgas).

Den anvendte isolering i scenarie 1.2 er ISOVER formstykker med en λ -værdi på $0,034 \text{ W/m}^2\text{K}$. Det ses, at isoleringer med en dårligere isoleringsevne har et mindre klimaaftryk, selv med et større materialeforbrug for at opnå samme isoleringsevne. For ROCKWOOL ses, at Flexibatts (B) med en λ -værdi på $0,037 \text{ W/m}^2\text{K}$ har den laveste klimapåvirkning af de sammenlignede materialer. Denne konklusion kommer med det forbehold, at produktionen af denne benytter biogas, og effekterne af denne energikilde har været heftigt debatteret²⁴. Til sammenligning ses ROCKWOOL Flexibatts (F) produceret med naturgas, som har en væsentlig højere klimapåvirkning.

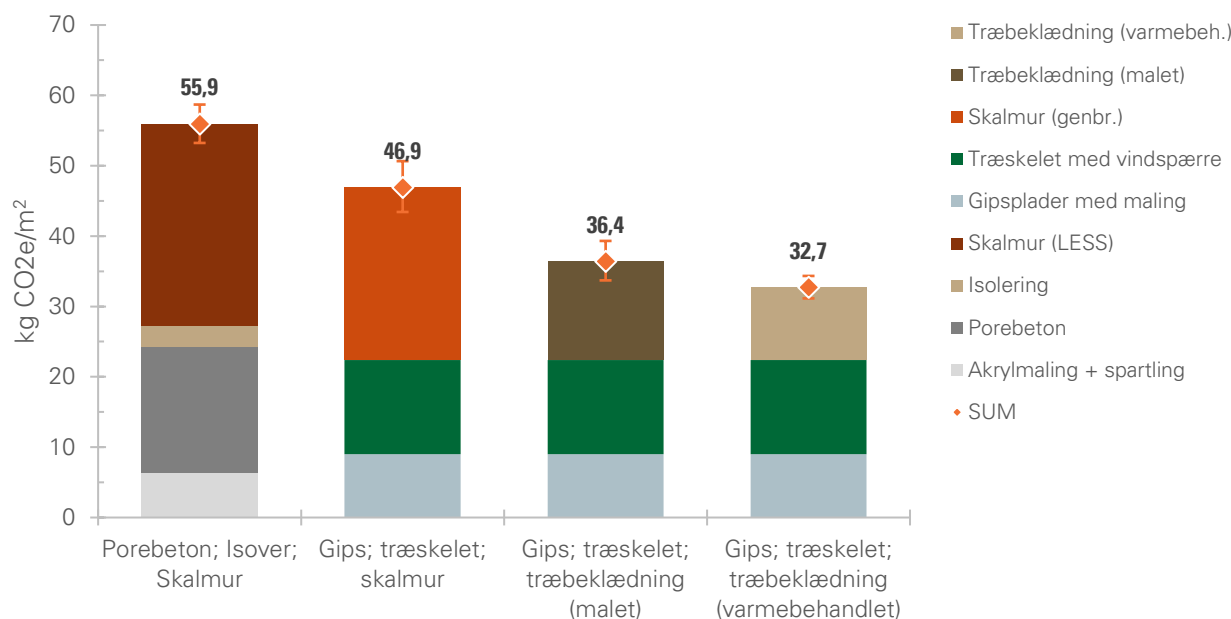
Bemærk, at de undersøgte materialer til bagmuren har forskellig varmeledningsevne, hvorved valget af dette materiale vil have indflydelse på isoleringens varmeledningsevne og/eller tykkelse.

For scenarie 2.2 ændres ydervæggen til 100 mm porebeton, 230 mm klasse 37 ISOVER formstykker og en regnskærm af LESS facadetegl. Indervægge ændres ligeledes fra letbeton til porebeton. Gipsplader på loft ændres til en letvægtsgipskartonplade, der er en glasfiberforstærket gipsplade.

5.5 Scenarie 3.2 (Bedste konstruktion)

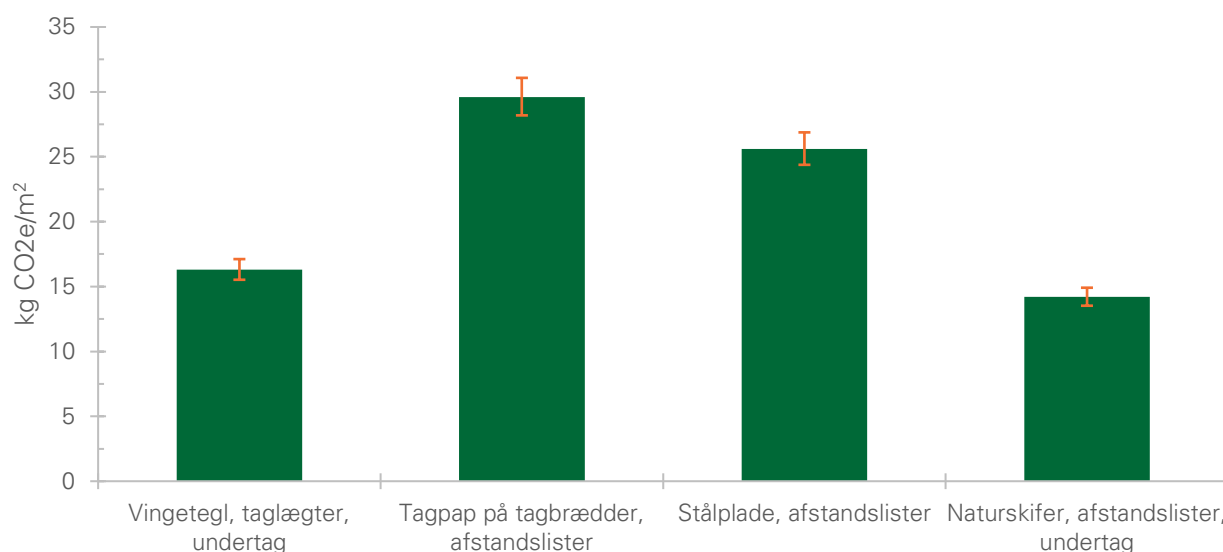
For scenarie 3.2 droppes dogmet om, at konstruktionsprincipperne skal bevares (dvs. tunge vægge, tegltag osv.). For at undersøge dette sammenlignes forskellige konstruktioner i en variantanalyse, hvor den funktionelle enhed for ydre konstruktioner er den samme U-værdi. For indvendige konstruktioner er der ikke stillet funktionelle krav, men det kunne eksempelvis basere sig på lyd-isolering. I det følgende vil variantanalyser for hhv. ydervægge og tage blive gennemgået. For begge analyser vises den valgte konstruktion fra scenarie 2.2 som den første i grafen.

²⁴ Se fx: <https://www.altinget.dk/forsyning/artikel/miljoebevaegelsen-noah-politikere-skal-stoppe-med-at-se-al-biogas-som-co2-neutralt> Besøgt den 26-05-2023



Figur 5.5: Sammenligning af ydervægskonstruktioner med U -værdi: $0,14 \text{ W/m}^2\text{K}$.

For ydervæggen er det valgt at undersøge effekterne af en let bærende konstruktion, med en variant af forskellige regnskærme. Det ses, at påvirkningen fra porebeton og isolering er større end påvirkningen fra den isolerede træskeletkonstruktion med plader på begge sider, så ved denne ændring af "byggeprincip" er der allerede en reduktion på ca. $5 \text{ kg CO}_2\text{e/m}^2$ væg. Af denne grund udføres indervæggene også som lette trækonstruktioner. Derudover kan regnskærmen også optimeres til enten en skalmur med genbrugssten, som har en lidt mindre påvirkning end LESS-murværket. Alternativt kan man benytte en træbeklædning, som enten er beskyttet mod klimaet med maling eller varmebehandling. For malerbehandlingen skal man desuden holde for øje, at denne kræver løbende vedligehold (dette er inkluderet i LCA beregningen i dette studie). Sidst, skal det også noteres, at tidsperspektivet for udregningerne er 50 år. Træbeklædningerne skal muligvis udskiftes efter 50-60 år. Dette vil potentielt kunne udligne besparelsen ved at bruge træbeklædning frem for (best-in-class) skalmur, hvis man bruger en længere betragtningsperiode.



Figur 5.6: Sammenligning af tagbeklædninger.

For tagkonstruktionen er der undersøgt forskellige typisk udbredte tagmaterialer. Fra Figur 5.6 ses, at den oprindelige tagkonstruktion har en forholdsvis lav klimapåvirkning. For tagpaptaget er størstedelen af klimapåvirkningen fra selve tagpappen, både produktionsfasen, samt afskaffelsen, hvor det antages at 30 % genanvendes, mens de resterende 70 % afbrændes. For tagkonstruktionen med stålplader forudsætter BUILDs levetidstabel at disse har en levetid på 40 år, hvorfor der indregnes en udskiftning. Hvis man kan dokumentere en levetid på 50 år for stålplader, ville det betyde en markant reduktion af klimaaftrykket for disse.

For vinduer og døre, er det valgt at erstatte træ-alu rammer med rene træ-rammer, som malerbehandles. For loftisoleringen erstattes mineralulden med papiruld.

Terrændæk og fundamenter er to konstruktionstyper som har et tæt "symbiotisk forhold", og mulige løsninger afhænger bl.a. af jordbundsforholdene på byggepladsen. Som en del af projektet '4 til 1 planet', er der samlet en case bank med de bedste bud på CO₂-reducerede byggerier²⁵. I en del af disse best practice byggerier er skruefundamenter og trækassetter en udbredt løsning. Denne løsning giver en lav klimapåvirkning, da mængden af EPS-isolering og armeret beton kan reduceres væsentligt. Dog peges der i studiet på, at det ofte er kommercielle bygherrer, som anvender denne løsning, og den betragtes derfor ikke som udbredt blandt private bygherrer endnu. En anden alternativ løsning til et linjefundament af beton og termoblokke, er det såkaldte 'Tversted-fundament', som består af celleglasplader med en trykstyrke på 900 kN/m², hvorpå der placeres en limtræs bjælke²⁶. Denne løsning er helt ny, og derfor også fravalgt pga. scopet og afgrænsningen i denne rapport. For terrændækket er der valgt en løsning med to lag celleglasplader, som erstatter både beton og EPS. Celleglaspladerne er lavet af genanvendt glas, men kræver en del energi til omsmelting. Samlet medfører denne konstruktion dog en klimareduktion, sammenlignet med terrændækket af beton og EPS. Generelt udgør fundamenter og terrændæk typisk en stor del af de samlede klimapåvirkninger for et byggeri, og der bør derfor være et øget fokus på alternative løsninger, udviklet i tæt samarbejde mellem arkitekter, konstruktører, ingeniører og entreprenører²⁷.

Den samlede indlejrede klimapåvirkning for scenarie 3.2 er **4,6 kg CO₂e/m²/år**, i alt 39,8 ton CO₂e. Terrændæk og fundamenter udgør i dette scenarie mere end 40 % af de indlejrede udledninger, og kan i tæt samarbejde med konstruktionsingeniører optimeres mere.

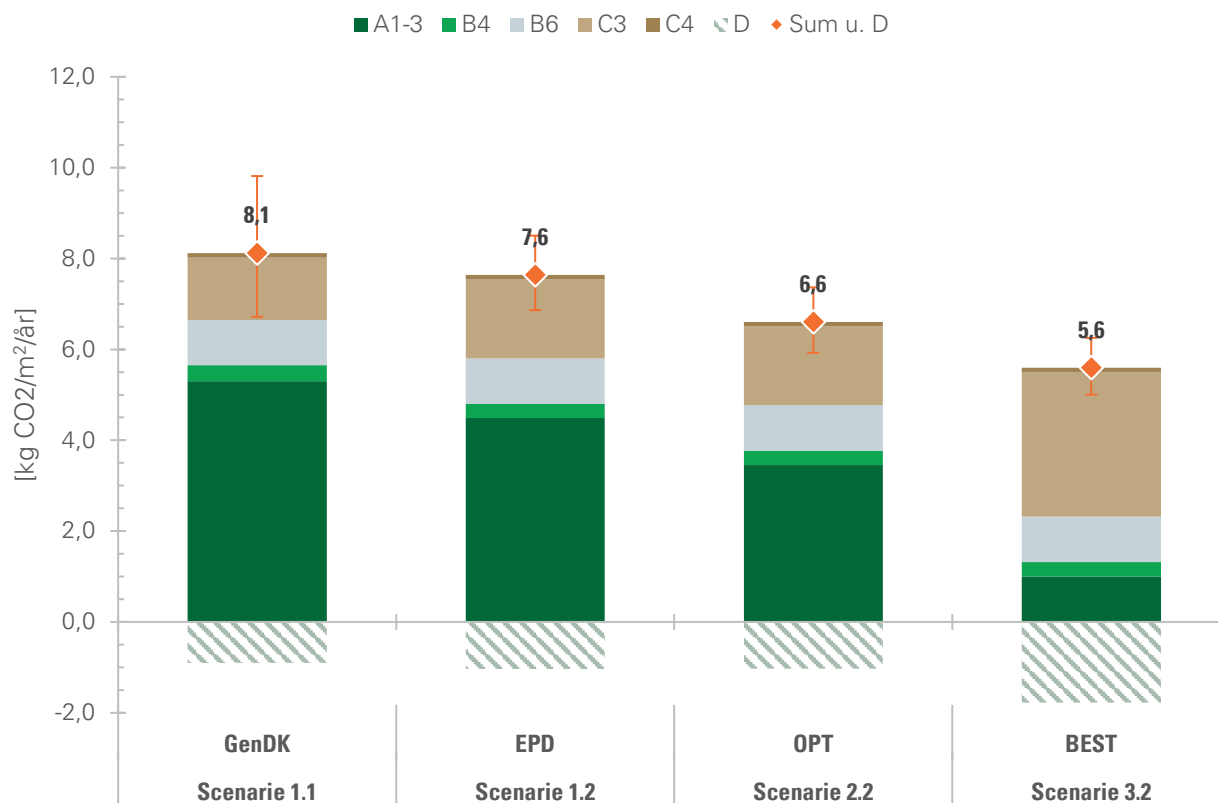
²⁵ <https://www.4til1planet.dk/1-planet-lab-videoer/deep-dives-i-best-practice-cases> Besøgt den 15-06-2023

²⁶ https://www.linkedin.com/posts/nikolova-aars%C3%B8_project-tversted-house-3-and-here-comes-activity-7068503677824573441-1Cpt/?utm_source=share&utm_medium=member_ios Besøgt den 15-06-2023

²⁷ Hatic, D., Lundberg, T. & Nielsen, J.G. (2022) *Det bæredygtige terrændæk – I hvilket omfang er det muligt at opnå CO₂e besparelser?* https://www.ucviden.dk/ws/files/160359178/Det_b_bredygtige_terr_nd_k_rapport.pdf



5.6 Sammenligning af husene/scenarierne



Figur 5.7: Sammenligning af de endelige klimapåvirkninger for de 4 scenarier. Påvirkningerne er fordelt på faser (se Figur 2.2).

Det ses på Figur 5.7 at alle scenarierne holder sig under grænseværdien i bygningsreglementet på 12,0 kg CO₂e/m²/år (dog kun gældende for byggerier større end 1000 m²), og hvis den mindst klimabelastende opvarmningstype (varmepumpe) vælges, er alle EPD-scenarier indenfor lavemissionsklassen på 8 kg CO₂e/m²/år.

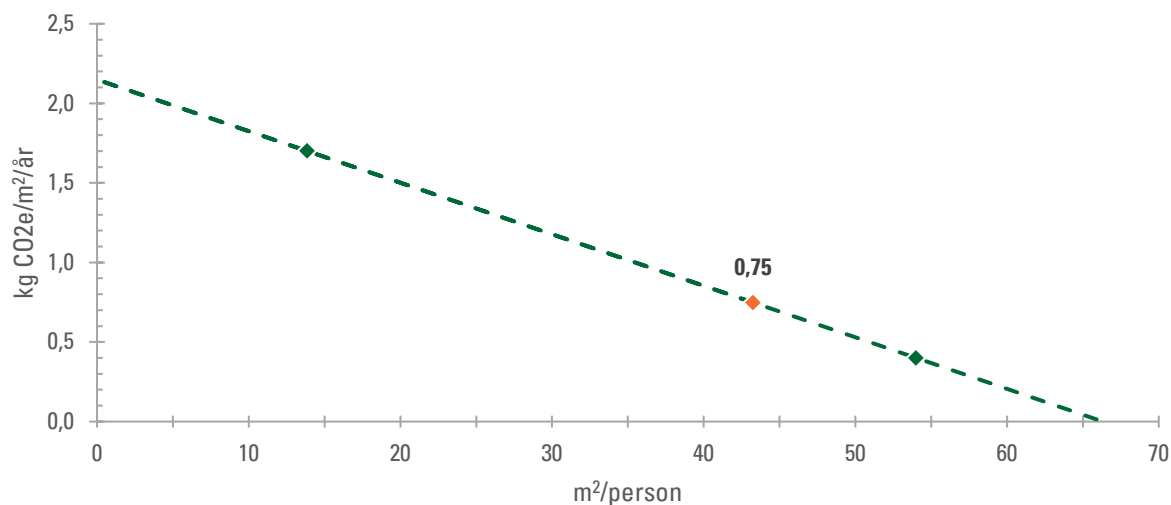
I studiet er der vist en reduktion på 35 % i indlejrede klimapåvirkninger fra baseline-scenariet, 1.1, til det bedste scenarie, 3.2.

Fra scenarie 1.1 til scenarie 2.2 kan man se, at det primært er udledningerne i faserne A1-3 der reduceres, mens udledningerne fra de resterende faser er af samme størrelsesorden. I scenarie 3.2 er udledningerne i faserne A1-3 yderligere reduceret, grundet brugen af biogene materialer, som samtidig øger udledningerne i C3 en smule. Desuden ses det, at genanvendelsespotentialet (D-modulet) for bygningen stiger i scenarie 3.2.

Som beskrevet udgør terrændæk og fundamenter en stor andel af alle scenarierne, og hvis husets klimapåvirkninger skal reduceres yderligere, skal disse konstruktioner erstattes af nye, mindre klimabelastende konstruktioner.

6 DISKUSSION

6.1 Planetære grænser



Figur 6.1: Tilladt absolut bæredygtig klimapåvirkning for Hus A (markeret med orange diamant), baseret på areal og antal beboere.

Huset i studiet er på 173 m² og beregnet til fire personer. Derfor tilskrives huset en grænse på 0,75 kg CO₂e/m²/år for at holde sig indenfor den planetære grænse for drivhusgasudledning, jf. afsnit 2.2. Det ses på Figur 5.7, at alle scenarier i studiet ligger langt over denne grænse. Fra hotspotanalyserne (se Appendix: Hotspotanalyser for scenarier) ser man, at den planetære grænse for drivhusgasudledning allerede er overskredet, når fundamentet er bygget. Desuden skal det notes, at alle faser ikke er inkluderet i LCA'en, og bygningens reelle klimapåvirkning således er endnu højere. Som nævnt skal især fundament- og terrændækskonstruktioner optimeres markant, hvor flere mulige løsninger er nævnt i afsnit 5.5.

6.2 Konsekvens-LCA

Som beskrevet under '**Allokeringsmetode**' i afsnit 3.1, er denne LCA udført som en attributional LCA (A-LCA). Opsummerende er formålet med en A-LCA at kortlægge de direkte effekter af et produkt eller systems fulde livscyklus. En konsekvens-LCA (C-LCA) forsøger derimod at kortlægge konsekvenserne ved en øget eller mindsket efterspørgsel af et produkt eller system. Begge metoder har sine fordele og ulemper. Ulemperne ved A-LCA, og især som metoden er beskrevet i EN15978, er bl.a. opgørelsen af klimapåvirkningen ved brug af genanvendte materialer. Her tages der ikke højde for, hvorvidt man benytter et reelt affaldsmateriale eller et genanvendt materiale der er en efterspørgsel på, og måske endda er en del af et begrænset marked. Et godt eksempel på sådan et materiale er skrotstål. I en A-LCA udført efter EN15978 kommer skrotstål med en væsentlig lavere klimapåvirkning end ny-produceret stål, hvorfor stålproducenter ofte anvender en væsentlig andel skrotstål, for at nedbringe CO₂e-udledningen forbundet med deres produkt (til gavn for producentens EPD). I en C-LCA betragter man denne situation anderledes. Skrotstål er nemlig et begrænset marked, hvilket vil sige, at udbuddet er mindre end efterspørgslen. I praksis betyder det, at når nogle stålproducenter prioriterer at indkøbe skrotstål til deres produktion, driver de prisen op, og andre producenter vil være nødsaget til at købe nyproduceret stål eller finde et alternativt produkt, der opfylder den samme funktion. Sidstnævnte kalder man den marginale teknologi eller det marginale produkt. Dette betyder således ikke, at der produceres mere skrotstål, men fører måske ligefrem til en øget produktion af ny-produceret stål, som øger den gennemsnitlige CO₂e-udledning af stål på markedet.

Samme problematik opstår, når virksomheder opkøber certifikater på grøn el, hvor man i en A-LCA således kan regne klimapåvirkningen af sit el-forbrug som væsentlig lavere CO₂e-aftryk end ved brug af det gennemsnitlige el-mix for landet. Der er en del diskussion om effekten af sådanne certifikater²⁸, og i en C-LCA skal man afgøre, hvorvidt opkøb af disse leder til et øget udbud af grøn strøm eller ej.

En anden ulempe eller begrænsning med A-LCA er, at selvom konklusionerne for det enkelte system kan være korrekte, fx at en træbygning har et lavere CO₂e-aftryk end en tilsvarende bygning i tunge materialer, så er det ikke sikkert at disse konklusioner holder, hvis de skaleres op til et større system, fx at alle bygninger fremover skal opføres i træ. Fx kan en øget efterspørgsel af konstruktionstræ føre til, at arealer med tidligere uberørt skov omdannes til dyrket skov, eller at landbrugsarealer omdannes til dyrket skov²⁹, hvilket potentielt kunne mindske mængden af CO₂e bundet i jorden, og således lede til større CO₂e-udledninger end antaget i en A-LCA.

En A-LCA udført efter EN15978 har dog også nogle fordele, som især er af praktisk karakter. For det første er det et afgrænset framework, hvor allokeringsreglerne gør det forholdsvis simpelt at afgrænse produktsystemet, hvorimod en C-LCA indebærer markedsanalyser for at definere det marginale produkt og yderligere antagelser om, hvor stor en erstatning mellem det oprindelige og det marginale produkt der vil ske ved en øget efterspørgsel. Desuden er det ikke sikkert, at der kun findes ét marginalt produkt, men at det originale produkt vil blive erstattet af flere forskellige produkter i forskellig grad. C-LCA bliver således mere kompleks og bygger på flere antagelser/vurderinger end A-LCA. Reduktionen af kompleksitet i A-LCA kombineret med den store tilgængelighed af data, baseret på et A-LCA-framework, gør også, at en LCA kan udføres inden for en overskuelig tidsramme. Den sidste pointe er, at A-LCA'er udført efter samme standard er nemmere at sammenligne end C-LCA-studier, hvor systemafgrænsningerne ikke nødvendigvis er de samme, og antagelser om fx marginale teknologier kan være vidt forskellige.

²⁸ <https://borsen.dk/nyheder/baeredygtig/branche-holder-fast-i-gronne-certifikater> Besøgt den 09-03-2023.

²⁹ Damsø Pedersen, C., Dyck-Madsen, S. & Jarby, C. (2021). *Anvendelse af træ i byggeriet: Fremsynsnotat*. <https://concito.dk/udgivelser/anvendelse-trae-byggeriet>



7 KONKLUSION

Af Figur 5.7 ses det, at alle scenarier overholder bygningsreglementets krav på 12,0 kg CO₂e/m²/år (som dog kun gælder bygninger større end 1000 m²), og for alle EPD-baserede scenarier overholdes kravet til lavemissionsklassen på 8 kg CO₂e/m²/år.

For alle scenarier udgør den indlejrede CO₂e-udledning den største andel af de samlede klimapåvirkninger, men det største potentiale i at nedbringe udledningerne uden at ændre design eller konstruktionsopbygning er ved at skifte fra opvarmning med naturgas til varmepumpe eller fjernvarme, hvor sidstnævnte har nogle systemiske kvaliteter, der, iflg. Concito, er bedre tilpasset en fremtid med en høj andel af grøn strøm.

For alle scenarier udgør terrændæk og fundamenter en stor andel af husets samlede klimapåvirkninger, og disse er kun minimalt optimeret på tværs af alle de betragtede scenarier. Videre optimering kunne basere sig på principperne fra 'Tversted'-huset, med brug af celleglasblokke, eller erfaringer fra 4-til-1 best cases, hvor der anvendes skruefundamenter og trækassetter (se afsnit 5.5). I scenarierne med tunge konstruktioner og teglmure (1.1, 1.2 og 2.2) udgør ydervægge den største andel af klimapåvirkningerne.

Ingen af scenarierne overholder de planetære grænser og selv det bedste scenarie (3.2 og opvarmning med varmepumpe) har en udledning der er næsten 7,5 gange så stor som den beregnede grænseværdi på 0,75 kg CO₂/m²/år (baseret på Reduction Roadmap).

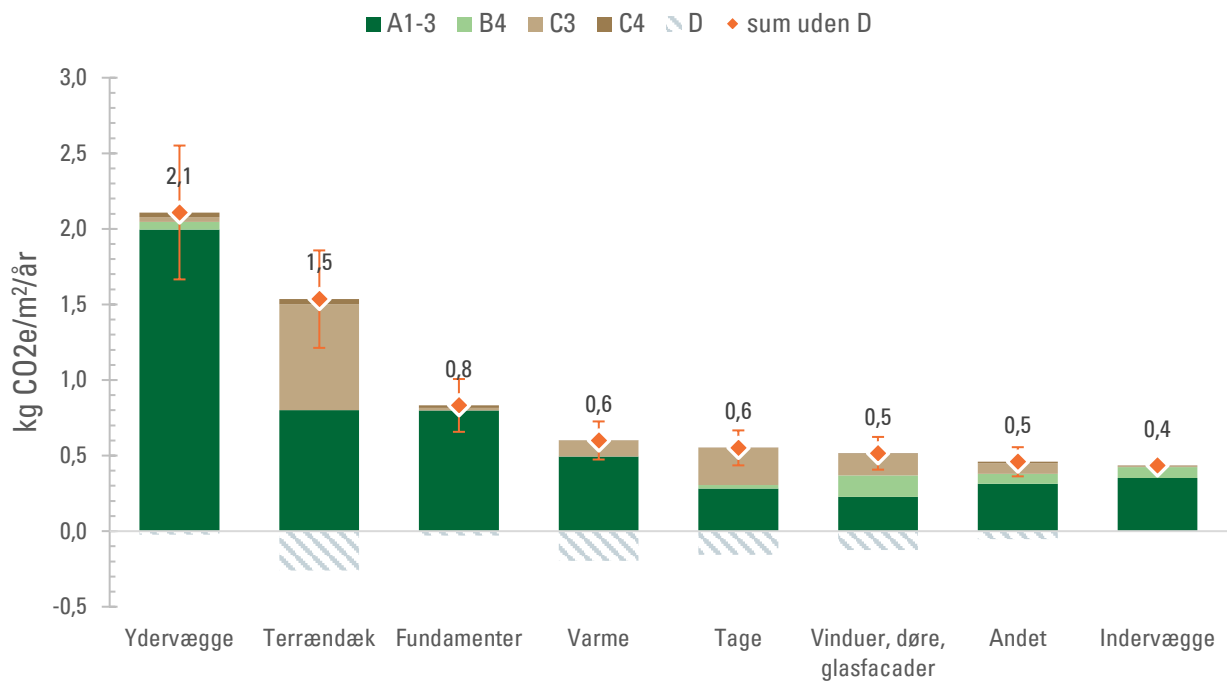
Generelt skal det bemærkes, at det kun er klimapåvirkninger, der betragtes i rapporten, og huset kan således påvirke andre relevante miljøpåvirkningskategorier, som ikke er beskrevet her. Desuden skal det bemærkes, at LCA'en er *attributional*, og konklusionerne i rapporten kan således ikke skaleres op til et større systemniveau, fx byggebranchen som helhed. Det vil sige, at konklusionen om, at klimaaftrykket kan reduceres ved at skifte fra fjernvarme til varmepumpe, gælder for den enkelte bygning, men denne konklusion er nødvendigvis ikke holdbar, hvis man forudsætter, at alle bygninger i Danmark fremover skal opvarmes med varmepumpe. Denne pointe er forsøgt belyst i afsnit 5.2. Desuden kan en øget efterspørgsel af træprodukter føre til øgede udledninger fra skovdrift.

Af Figur 5.7 kan det udledes, at der er et overlap mellem usikkerhederne for scenarie 2.2 og 3.2, og der er således en (lille) mulighed for, at scenarie 3.2 ikke er bedre end 2.2. Til dette kan tilføjes, at flere faser er udeladt (se Figur 2.2), hvilket også kan skjule væsentlige forskelle mellem tunge og lette bygningssystemer, fx kan udledninger fra transport til byggepladsen differentiere, som både afhænger af emnets vægt og transportdistance fra produktionssted til byggepladsen.

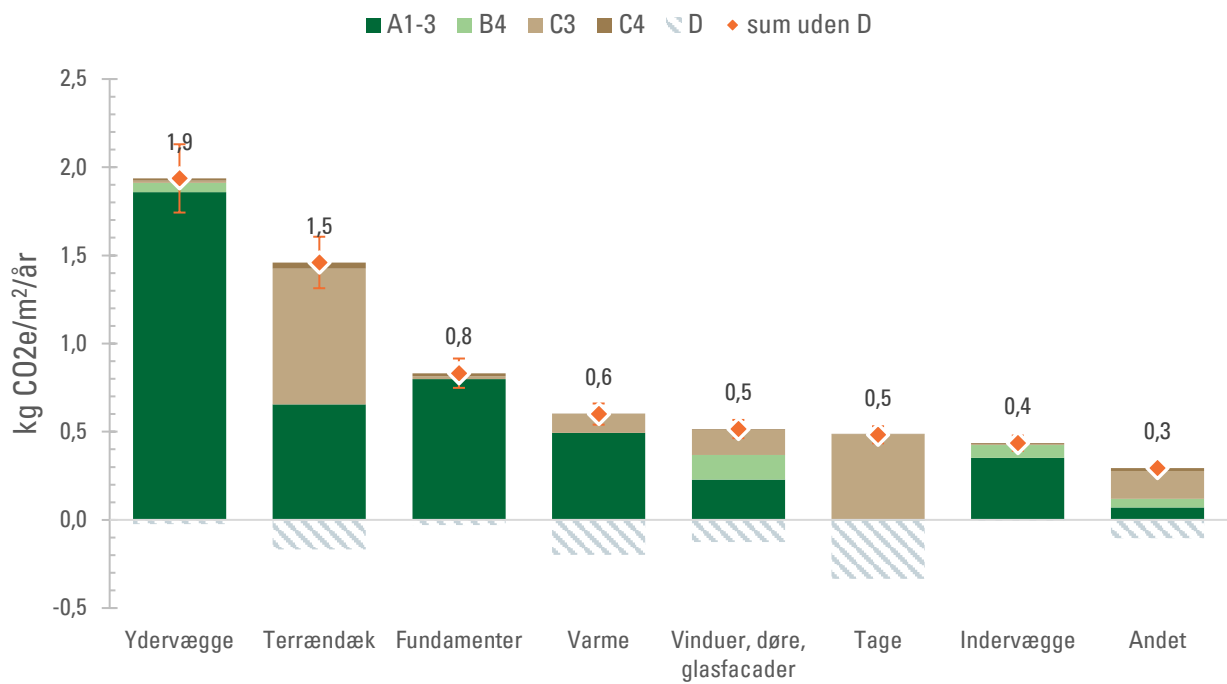


A. APPENDIX: HOTSPOTANALYSER FOR SCENARIER

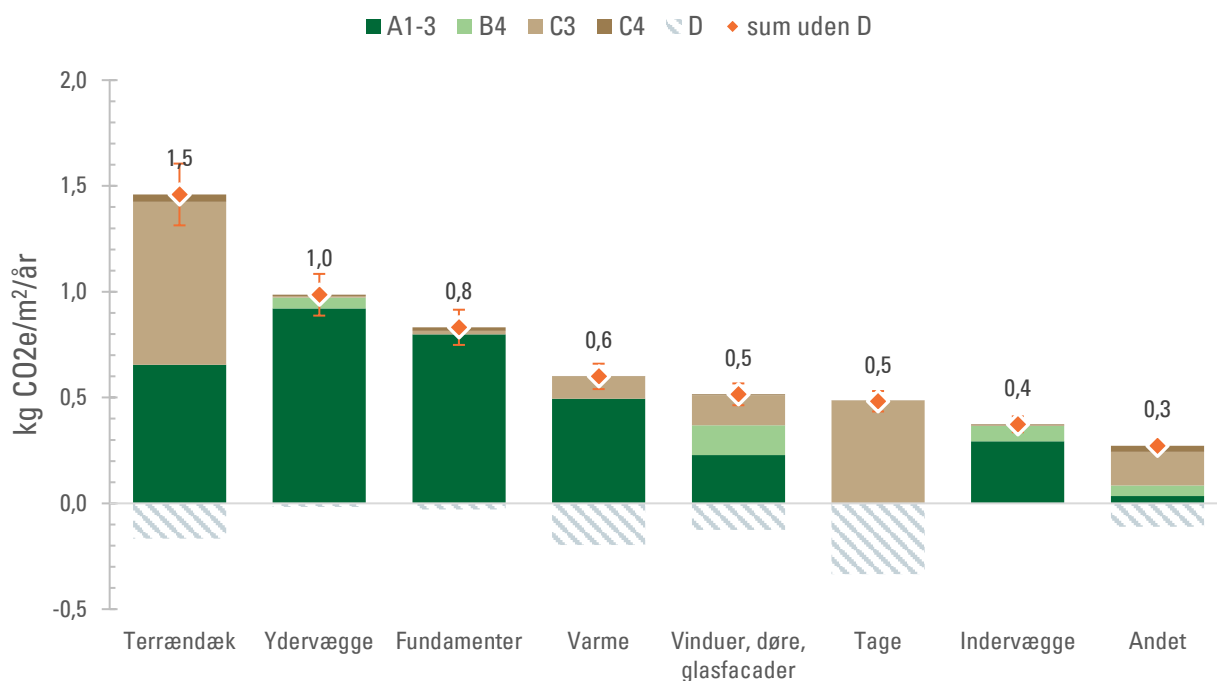
Scenarie 1.1:



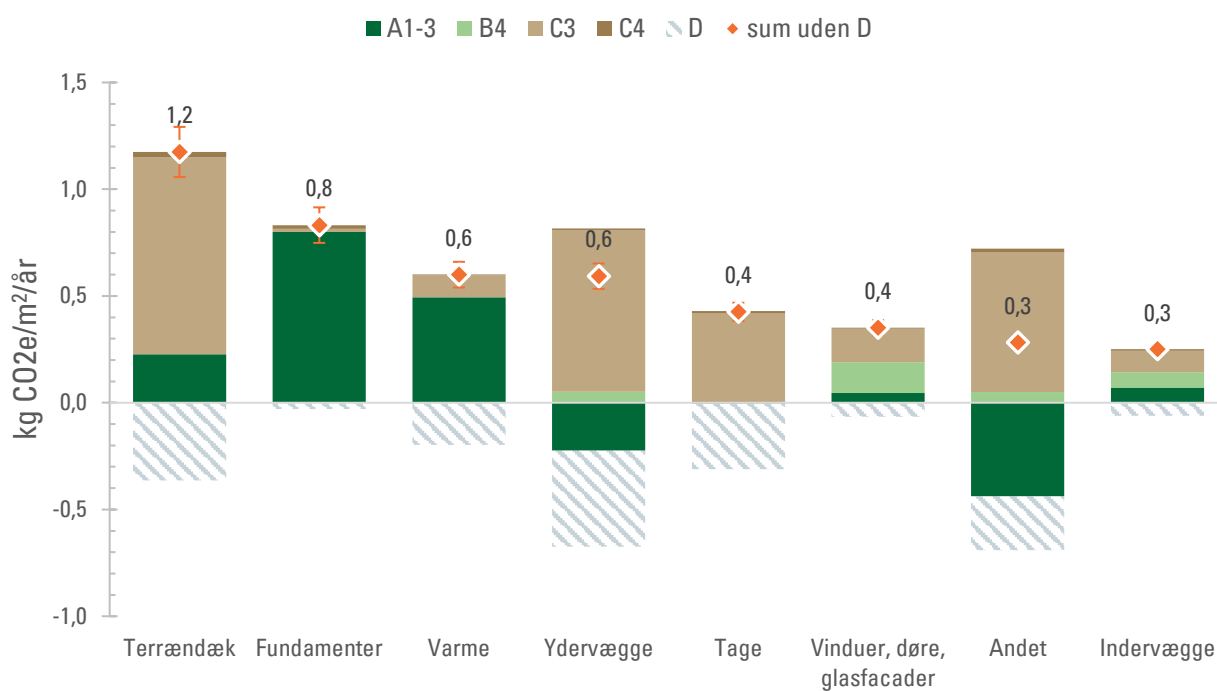
Scenarie 1.2:



Scenarie 2.2:



Scenarie 3.2:



BygherrePartner ApS
Lombjergervej 1, 5750 Ringe
CVR 41232234
www.BygherrePartner.com

